

ДИНАМИКА НАТУРНЫХ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ

Беляев В.С., главный научный сотрудник,
доктор технических наук,
ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, Россия;
Костарев В.С., директор, кандидат технических наук,
ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, Россия;
Васильев П.С., главный специалист,
ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, Россия;

Согласно действующим российским нормам СП14-13330-16 [1] методы и средства обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений включают четыре основные группы инженерных мероприятий. Первая из них предусматривает выполнение специальных проектных требований при разработке строительных конструкций, оборудования, инженерных коммуникаций, минимизирующих возможность отказа (разрушения) элементов и систем зданий и сооружений и безусловно предотвращающих их неуправляемое катастрофическое разрушение. Вторая группа включает обоснование рационального выбора объемно-планировочного решения зданий и сооружений для снижения требуемой проектной сейсмостойкости конструкций и оборудования, облегчения условий непрерывного функционирования или ускорения восстановления объекта. В третью группу входят инженерно-строительные мероприятия, предусматривающие применение систем сейсмоизоляции для регулирования сейсмической реакции строительных и нестроительных конструкций, раскрепление оборудования, ограничение деформации инженерных коммуникаций, изменение свойств прилегающей грунтовой среды для трансформации сейсмического воздействия землетрясения. Появление этой группы проектных требований в нормативных документах многих стран, например, [2; 3], в последнее десятилетие вызвано насущной необходимостью снижения ущерба от землетрясений вследствие практически всеобщего повышения расчетной интенсивности проектных землетрясений при сохранении неопределенности сейсмического прогноза. Целесообразность использования конкретных мероприятий из этой, дополнительной к первым двум группы определяется на основе технико-экономического анализа. Важной составляющей нормативных требований является также проведение регулярного контроля за состоянием строительных конструкций, оборудования и инженерных коммуникаций (четвертая группа), без данных которого оценка фактической сейсмостойкости объектов невозможна.

Традиционное сейсмическое проектирование (первая и вторая группа инженерных мероприятий) имеет целью защиту человеческих жизней и ограничение уровня ущерба. Так, сейсмические нормы [1-3] требуют, чтобы заметные повреждения не появлялись при землетрясениях малой и умеренной интенсивности. В то время как при сильных землетрясениях требуют только отсутствия обрушения, допуская существенные повреждения. На основе этой концепции упругий спектр, который соответствует реальным ускорениям строительных конструкций, модифицирован для получения проектного спектра. В этом спектре действующие ускорения понижаются посредством коэффициентов (K_1 и K_2 в российских нормах [1]), которые зависят от объема допускаемых повреждений зданий и сооружений и их способности к рассеиванию энергии. Снижение уровня спектральных ускорений может быть очень существенным (до 4-5 и более раз), если строительная конструкция способна повреждаться рациональным образом с учетом нескольких элементов, предупреждая обрушение. Этот принцип не является универсальным, несмотря на широкое применение в сейсмическом проектировании, поскольку не учитывает сейсмическую реакцию нестроительных элементов, оборудования и коммуникаций. Вполне очевидно, что сохранность этих компонентов зданий и сооружений в значительной степени определяет способность

стратегически важных объектов, таких как сооружения гражданской обороны, связи и управления, мосты, госпитали и т.д., сохранять работоспособность во время и немедленно после землетрясения. Это безусловно относится и к объектам высокого риска (АЭС, химпроизводства и т.д.), которые должны удовлетворять высоким требованиям по безопасности. В случае зданий общегражданского назначения сейсмические события последних лет продемонстрировали, что использование современных технологий традиционного проектирования может успешно ограничить повреждение основных строительных конструкций во время интенсивных землетрясений. Однако зарегистрированный при обследованиях, например, [4-6], ущерб для несущих строительных и нестроительных элементов оказался весьма значительным, очень дорогостоящим и может даже привести к гибели людей. После землетрясения 1994 Northridge стоимость восстановления нежилых помещений для зданий и сооружений составила 6.3 млрд. долларов, из которых только 1,1 млрд. долларов из-за разрушения строительных конструкций, остальные потери связаны с повреждением нестроительных компонентов. В частности, 88% пациентов из 13 госпиталей были эвакуированы вследствие выхода из строя систем энерго- и водоснабжения, лифтов, санитарно-технического оборудования, в том числе операционного, потолочных систем. При недавнем землетрясении 2010 Darfield, которое вызвало подобные повреждения, потери оценены в 5 млрд. новозеландских долларов. Необходимо подчеркнуть, что в последние годы, согласно японским нормам, объекты типа госпиталей строятся только с применением дополнительных инженерных мероприятий третьей группы.

По существующим представлениям среди дополнительных инженерных мероприятий третьей группы действий в условиях высокоинтенсивных землетрясений наиболее эффективным средством сейсмозащиты как основных строительных конструкций, так и несущих строительных и нестроительных компонентов, персонала, оборудования и систем жизнеобеспечения является сейсмоизоляция фундамента зданий и сооружений. Базовая идея сейсмоизоляции в этом случае заключается в полном разделении верхней строительной конструкции и взаимодействующего с грунтом фундамента горизонтальным слоем изолирующих устройств. Под влиянием изолирующего слоя динамическая реакция верхней конструкции при землетрясении видоизменяется путем понижения собственной частоты ее колебаний или фрикционного ограничения действующих сейсмических ускорений. Необходимо отметить, что в течение многих лет превалирующей гипотезой проектирования и конструирования систем сейсмоизоляции (ССИ) для объектов разного назначения было обеспечение защиты от горизонтальных составляющих сейсмического воздействия сильных землетрясений путем снижения ускорений поступательных горизонтальных колебаний верхней защищаемой части сооружения (СИЧС) за счет параллельно сдвиговых деформаций (перемещений) опорных сейсмоизолирующих устройств (СУ). При этом предполагалась возможность рассмотрения СИЧС как твердого тела, влияние вертикальной составляющей воздействия на движение которого считалось незначительным. Простота принципа функционирования и значительные преимущества применения вызвали появление большого количества технических решений СУ систем сейсмоизоляции фундамента. К настоящему времени целый ряд ССИ после детальной проектной разработки, расчетных и экспериментальных исследований готов для широкого практического применения во всем мире. По имеющимся данным к 2014 году объектов с ССИ в 30 странах мира было более 20000. В области гражданского и промышленного строительства количество новых и восстанавливаемых конструкций с сейсмоизоляцией фундамента возрастает очень быстро, особенно в районах с повышенной сейсмоактивностью в последние годы.

Как следствие, возможность попадания натуральных зданий и сооружений с ССИ в зону действия сильных сооружений увеличивается, и реализуются условия для получения данных о фактической эффективности их применения, а также для проверки адекватности методик проектирования, принятия гипотез и допущений.

В связи с тем, что до 1989 года существующие конструкции с ССИ не подвергались большому землетрясению, а экспериментальные исследования были ограничены проверкой функционирования ССИ на масштабированных моделях, полная оценка корректности основной гипотезы отсутствовала по объективным причинам. Два обстоятельства, помимо отмеченного резкого увеличения количества зданий и сооружений с ССИ в сейсмоопасных районах, существенно повлияли на расширение базы данных о поведении сейсмоизолированных объектов и фактической эффективности ССИ разных типов. Прежде всего, это введение в действие специалистами ряда стран, особенно Японии, США и Китая, развитой сети автоматических станций мониторинга и регистрации параметров сейсмических колебаний грунта и конструкций зданий, в том числе сейсмоизолированных. Первые, пригодные для анализа данные регистрации сейсмических колебаний натуральных зданий с ССИ получены при землетрясении 1994 Northridge (США). Следует отметить, что эти данные и показания последующих сильных землетрясений чрезвычайно важны для верификации методов расчета и нормативной основы проектирования зданий с ССИ. В докладе представлено обобщение опубликованных данных о сейсмической реакции зданий с ССИ при действии землетрясений 1994 Northridge, 1995 Kobe, 2004 MidNiigata, 2008 Wenchuan, 2011 Tohoku, 2013 Lushan, 2016 Kumamoto. Магнитуды этих землетрясений, произошедших на грунтовых площадках с существенно отличающимися физико-механическими свойствами, находятся в диапазоне от 6,8 (Northridge) до 9.0 (Tohoku). Абсолютное большинство ССИ в освидетельствованных зданиях относилось к горизонтальным сейсмоизолирующим системам (см. Таблицу [4]).

Таблица. Данные регистрации трехкомпонентного движения конструкции здания с ССИ

№ п/п	Этаж-ность	Тип ССИ	Δ, км	Расположение датчиков	Макс. ускорения, см/с ²			Смещение СИ, см
					X	Y	Z	
1	9	ВДЭО + МД	172	фундамент	289	251	235	15,7
				1 этаж	121	144	374	
				крыша	142	170	524	
2	2	НЭО + СЭО + СКО + МД	178	фундамент	582	756	446	24,6
				1 этаж	176	213	516	
				крыша	155	185	621	
3	3	СЭО + СКО + МД	184	фундамент	411	334	324	5,8
				1 этаж	184	226	463	
				крыша	154	157	581	
4	7	НЭО + СЭО + СД	334	фундамент	327	233	122	6,8
				1 этаж	92	76	198	
				крыша	126	91	243	
5	4	ВДЭО	382	фундамент	100	79	84	4,2
				1 этаж	76	89	87	
				крыша	100	77	90	
6	12	НЭО + СЭО	386	фундамент	104	91	58	5,1
				1 этаж	55	41	62	
				крыша	94	82	104	
7	6	НЭО + СЭО	401	фундамент	86	104	34	5,2
				1 этаж	58	65	49	
				крыша	63	68	55	
8	6	НЭО + СЭО	457	фундамент	136	120	47	25,2
				1 этаж	58	134	47	
				крыша	63	67	48	

В Таблице приняты следующие обозначения: НЭО – опоры из натурального эластомера, ВДЭО – опоры из высокодемпфирующего эластомера, СЭО – свинцово-эластомерные опоры, СКО – скользящие опоры, МД – демпферы из металла, СД – демпферы из свинца. Часть ССИ включали комбинацию сейсмоизолирующих устройств: эластомерных опор, фрикционно-маятниковых, скользящих опор и демпферов с различными гистерезисными механизмами. В качестве примера в таблице представлены данные регистрации трехкомпонентного движения конструкций восьми зданий с ССИ при 2011 Tohoku землетрясении.

Общее заключение по материалам обследования зданий с ССИ после сильных землетрясений подтверждает достаточную эффективность снижения горизонтальных нагрузок на строительные конструкции сейсмоизолированных зданий, зарегистрирована их сохранность во всех случаях. Вертикальная составляющая сейсмических колебаний грунта регулярно возрастает в 2-2,5 раза на верхних этажах здания. Действие ослабленных горизонтальных и усиленных вертикальных сотрясений в изолированных зданиях приводит к повреждению нестроительных компонентов и в ряде случаев элементов ССИ.

Однако, с учетом случайного характера появления сильных землетрясений формирование достаточно большого объема представительных материалов объективно затруднено. Существенным дополнением к ним являются показания стендовых испытаний натуральных зданий с ССИ на сейсмоплатформе E-Defense (Япония). Эта сейсмоплатформа грузоподъемностью 1200 тн обеспечивает возможность проверки практической сейсмостойкости крупных строительных и оборудования в условиях детального воспроизведения амплитудных и временных характеристик действия высокоинтенсивных многокомпонентных сейсмических нагрузок. В период 2010-13 г.г. на сейсмоплатформе E-Defense проведены испытания типовых 4-х, 5-ти и 10-ти этажных натуральных зданий с различными ССИ. Несмотря на реальные ограничения стендовой постановки испытаний (массы и размеров имитируемого образца – натурального здания с ССИ, жесткого крепления нижней части опор или фундаментной плиты здания к поверхности сейсмоплатформы) при проведении опытов получен большой объем экспериментальных данных в условиях вариации параметров трехкомпонентного сейсмического возбуждения, соответствующего воздействию принятых при проектировании этих зданий землетрясений. В состав испытаний входила также имитация идеализированного двухкомпонентного нагружения.

В результате методически организованных испытаний при опытном сравнении сейсмической реакции каждого из зданий при наличии ССИ и при жестком закреплении его фундамента к сейсмоплатформе выявлен ряд существенных отклонений в сторону ухудшения функционирования всех горизонтальных ССИ от проектных показателей при наличии в стендовом воздействии сильной или даже умеренной вертикальной составляющей. Значение коэффициента передачи сейсмических колебаний от фундамента зданий составляет по горизонту $0,85 \div 1,05$, по вертикали его величина в середине поэтажных перекрытий достигала $6 \div 8$ и более раз. Следует отметить, что эти эффекты проявляются во всех случаях испытанных образцов:

- пятиэтажного здания со стальным каркасом (здание с гибкой конструктивной схемой), сейсмоизолированного гибридной (свинцово-эластомерные опоры и скользящие гибридные опоры) системой и системой с фрикционно-маятниковыми опорами;
- зданий с более жесткой конструктивной схемой, четырехэтажного здания с железобетонным каркасом с ССИ на высокодемпфирующих эластомерных опорах, десятиэтажного здания с железобетонным каркасом на скользящих опорах из чугуна.

В целом материалы обследований и анализа сейсмостойкости зданий и сооружений с ССИ при землетрясениях и данные полномасштабной проверки сейсмической реакции натуральных зданий с ССИ на сейсмоплатформе E-Defense (см., например [7-9]) указывают на объективно существующие ограничения эффективности функционирования

горизонтальных ССИ при реальных трехкомпонентных воздействиях землетрясения. Эти ограничения и особенности поведения зданий с горизонтальной сейсмоизоляцией независимо от типа сейсмоизолирующих опор должны учитываться при проектировании. Для зданий и сооружений повышенной ответственности (системы МЧС, управления и информации, госпитали и объекты транспорта и т.п.) и, особенно, АЭС и крупных химпроизводств целесообразно применение трехкомпонентных систем сейсмоизоляции. В мировой практике в последнее время появился широкий интерес к разработке этих систем (Россия, Япония, Китай, Корея, США, Германия) [10]. Трехкомпонентная ССИ должна быть оснащена опорами, гибкими в вертикальном и горизонтальном направлениях, обычно представленными комбинацией металлических или воздушных пружин и дополнительных демпфирующих устройств. На ранних стадиях исследований предлагалось использование эластомерных опор с увеличенной толщиной слоев эластомера. В этом случае характерно появление существенных поворотных и торсионных деформаций.

Разработки применительно к условиям строительства блока ВВЭР-1200 на площадке с повышенной сейсмичностью выполнены в настоящее время специалистами фирмы «ЦКТИ-Вибросейсм» (г. Санкт-Петербург) совместно с фирмой GERB (Германия). Процесс оптимизации статических и динамических характеристик предложенной пружинно-демпферной трехкомпонентной ССИ показал, что предпочтительной является система с первой собственной частотой в горизонтальном направлении $1 \div 1,5$ Гц, в вертикальном направлении $2 \div 2,5$ Гц и демпфированием 20% от критического. Расчетное снижение горизонтальных ускорений входного воздействия составляет $5 \div 10$ раз, вертикальных ускорений $2 \div 4$ раза, относительные перемещения в угловых опорах не превышают 60 мм.

В сентябре-октябре с.г. запланировано проведение испытаний фрагмента натурной ССИ на стенде грузоподъемностью 2500 тонн.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП14-13330-16 (2016). Строительство в сейсмических районах. М.: Минстрой РФ
2. American Society of Civil Engineers (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures // ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, Reston, VA, USA.
3. Architectural Institute of Japan (2001). Recommendation for the Design of Base Isolated Structures
4. M.Liba et al. (2013). Behavior of Seismically Isolated Buildings Based on Observed Motion Records during the 2011 Great East Japan Earthquake // Proc. of the 13th WCSI. Sendai (Japan)
5. T.Fujita (2005). State of the Art on Application of Seismic Isolation to Civil and Industrial Structures in Japan // Proc. of the 9th WCSI. Kobe (Japan)
6. K.Morita, M.Takayama (2017). Behavior of Seismically Isolated Buildings during the 2016 Kumamoto Earthquake // Proc. of the 2017 NZSEE conf. New Zealand
7. T.Sasaki et al. (2012). NEES/E-Defense Base-Isolation Tests: Effectiveness of Friction Pendulum and Lead-Rubber Bearings Systems // Proc. of the 15 WCEE Conf. Lisboa (Portugal)
8. S. Furukawa et al. (2013). Comparison of Vertical Dynamic Response Characteristics of Two Base-isolated Buildings based on Full-scale Shaking Table Test // Proc. of the 13th WCSI. Sendai (Japan)
9. K.Kajiwara et al. (2017). 2015 Three-dimensional Shaking Table Test of a 10-story Reinforced Concrete Building on the E-Defense // Proc. of the 16 WCEE Conf. Santiago (Chile)
10. W. Eltahawy et al. (2017). Fundamental Dynamics of 3-Dimensional Seismic Isolation // Proc. of the 16 WCEE Conf. Santiago (Chile)